

Ю.Г.КАЗАРЯН, Институт импульсных процессов и технологий
НАН Украины, Николаев

ЗАРЯДНЫЕ УСТРОЙСТВА ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ ЯЧЕЕЧНОЙ СТРУКТУРЫ С КОРРЕКЦИЕЙ ОТКЛОНЕНИЙ СОБСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ ЯЧЕЕК

Проаналізовано зміну в АЧХ високочастотного трансформатора у процесі заряду накопичувача енергії. Розроблено блок–схему коміркового ЗП із можливістю врахування розкиду власних параметрів трансформаторів комірок та контролю за зміненням частоти резонансу трансформаторів у процесі заряду СНЕ.

The change of a high-frequency transformer's AFC is parsed during a charge of an energy store. The unit-scheme of the cellic STORAGE with a capability of the registration of dispersion of cells' transformers' own parameters and control over the transformer's frequency drift of a resonance is designed during a capacitor charge.

Введение. Объектом исследования является мощное высоковольтное высокочастотное оборудование заряда емкостных накопителей энергии для электроразрядных технологий. Для уменьшения массогабаритных показателей зарядного устройства (ЗУ), эффективным способом является повышение частоты преобразования. Технологические требования заказчиков разнообразны и в большинстве случаев требуют гибкой структуры преобразователя, для чего целесообразно использовать ячеичную структуру построения ЗУ. Диапазон мощностей разрабатываемых устройств 5 – 20 кВт, выходных напряжений 5 – 50 кВ. Параллельно-последовательное соединение ячеек (рис. 1) позволяет изменять выходные параметры ЗУ, наращивать мощность и напряжение в зависимости от требований к устройству. Кроме того, такой подход к построению ЗУ значительно улучшает ремонтпригодность устройства, позволяет использовать более дешевую элементную базу.

В связи с тем, что при мощностях высокочастотного преобразователя 10 – 20 кВт, основные тепловые потери в транзисторах силовых ключей на рабочих частотах (20 – 50 кГц) обусловлены потерями переключения, эффективным способом снижения потерь является использование переключения при нулевом токе, т.е. использование квазирезонансного режима работы инвертора. Соответствующая резонансная цепочка может быть обеспечена собственными параметрами мощного высоковольтного трансформатора, так как нагрузкой инвертора является его первичная обмотка [1]. Таким образом, использование собственных параметров высоковольтного высокочастотного трансформатора (ВВТ) позволяет реализовать на его основе источник тока

вместо использовавшегося ранее для этих целей индуктивно – емкостного преобразователя ИЕП. Особенность проектирования такого устройства - высокая добротность ВВТ [1], которая может привести к значительному изменению поведения системы вблизи резонанса. Резонансная частота в свою очередь изменяется в процессе заряда вследствие изменения эквивалентного сопротивления нагрузки трансформатора от короткого замыкания до бесконечности. Это изменение может привести к непредвиденному выходу трансформатора из квазирезонансного режима и изменению выходного напряжения ячеек, значительно возрастают требования к системе управления, которая должна адекватно и вовремя отреагировать на происходящие изменения. Анализ количественной оценки изменения резонансной частоты в процессе заряда от номинальной, представляет собой важную задачу исследований.

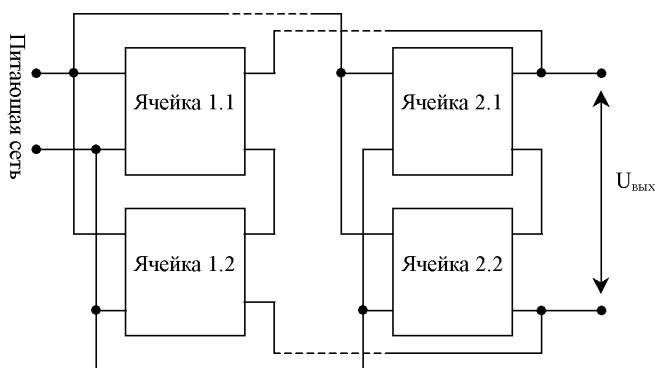


Рисунок 1 – Блок – схема ячейечного ЗУ

Цель работы. Определить количественное изменение резонансной частоты ВВТ в зависимости от разброса собственных параметров трансформаторов ячеек при работе на разноимпедансную нагрузку.

Задачи исследования. Используя математическую модель трансформатора и программный продукт PSpice определить отклонение резонансной частоты ВВТ при изменении собственных параметров трансформаторов ячеек и изменения эквивалентного сопротивления ЕНЭ.

Анализ проблемы. ЗУ ячейечной структуры, содержащее резонансный преобразователь частоты на мощности 10 – 20 кВт, достаточно критично к положению рабочей точки трансформатора на его АЧХ. Во-первых это обусловлено применением квазирезонансного режима работы ВВТ с использованием его собственной емкости вторичной обмотки и индуктивности рассеяния для обеспечения режима переключения ключей при нулевых токах. Это приводит к уменьшению динамических потерь переключения и увеличе-

нию общего КПД преобразователя. Во-вторых, наличие последовательного резонансного контура придает преобразователю свойства естественного ограничения тока, мягкость выходной характеристики и возможность параллельной или последовательной работы нескольких ячеек на общую нагрузку для получения необходимых энергетических характеристик ЗУ [2].

Приведенная матмодель полной Т-образной схемы замещения экспериментального ВВТ позволила определить влияние ее элементов на АЧХ и выделить диапазон рабочих частот.

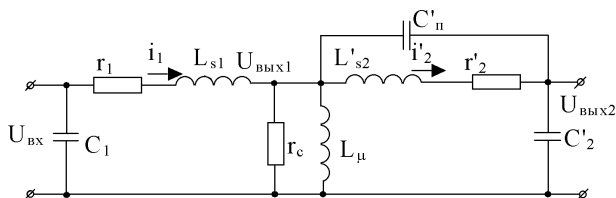


Рисунок 2 – Схема замещения ВВТ

Передаточная функция трансформатора представляет собой последовательное соединение четырех передаточных функций и записывается в виде:

$$W = W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot W_4 = \frac{T_1 p \cdot (T_{33}^2 p^2 + 2\xi_{33} T_{33} + 1)}{(T_{22}^2 p^2 + 2\xi_{22} T_{22} + 1) \cdot (T_{44}^2 p^2 + 2\xi_{44} T_{44} + 1)},$$

где W_1 – дифференцирующее звено с запаздыванием, определяющееся дифференцирующей цепочкой R_1, L_m

$$W_1 = \frac{\frac{L_{\mu}}{r_1} p}{\left(1 + p \frac{L_{s1}}{r_1}\right) \left(1 + p \frac{L_{\mu}}{r_c}\right) + \frac{L_{\mu}}{r_1}} = \frac{T_2 p}{r_1 (T_2 p + 1) (T_3 p + 1) + T_2 p};$$

W_2 – колебательное или аperiodическое звено второго порядка, определяющееся последовательным колебательным контуром L_{μ}, C'_2

$$W_2 = \frac{R_n}{r_2 \left(1 + p \frac{L_{s2}}{r_2}\right) (p R_n C'_2 + 1) + R_n};$$

W_3 – квазифорсирующее или дифференцирующее звено второго порядка, определяющееся параллельным колебательным контуром L_{s2}, C'_2 ;

W_4 – колебательное или аperiodическое звено второго порядка, определяющееся последовательным колебательным контуром C'_1 с параллельно-последовательным соединением L_{s1}, C_n .

W_2, W_3, W_4 – могут иметь как колебательный характер так и аperiodический. Это зависит от величины декремента затухания $\xi < 0,707$. Высота пика

будет тем больше, чем меньше параметр затухания:

$$A(\omega) = \frac{k}{2 \cdot \xi \cdot \sqrt{1 - \xi^2}}$$

Результаты измерений экспериментального образца трансформатора показали, что его собственные параметры лежат в диапазонах, обеспечивающих резонансные пики на АЧХ. Интерес представляет работа на частоте, соответствующей постоянной времени T_2 (рис. 3). Напряжение на этом участке АЧХ соответствует выходному напряжению, равному входному или выше. На остальных частотах происходит значительное ослабление выходного напряжения, поэтому они не представляют интереса.

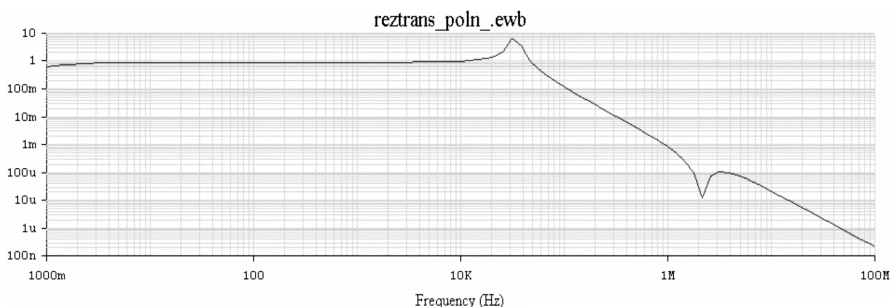


Рисунок 3 – ЛАЧХ ВВТ

Что касается частоты и амплитуды колокола основного резонанса, то анализ результатов моделирования показал, что она изменяется в процессе зарядки и значительно зависит от значения эквивалентного сопротивления на выходе ВВТ, шунтирующего собственную емкость вторичной обмотки C_2 .

В PSpice проведено моделирование работы ВВТ по схеме замещения (рис. 2) на нагрузку, изменяющуюся в широком диапазоне значений. Полученные АЧХ для различных сопротивлений нагрузки представлены на рис. 4.

Из приведенных зависимостей видно изменение резонансной частоты ВВТ в области низкого сопротивления нагрузки в меньшую сторону на 20 %. В области сопротивления близкого к короткому замыканию, резонанс отсутствует.

Полученные зависимости позволяют учесть отклонение резонансной частоты ВВТ при построении системы управления ячейками. Резонансная частота понижается в области низких сопротивлений нагрузки, и, следовательно, начала заряда ЕНЭ. Задачей системы управления ЗУ является поддержание квазирезонансного режима работы преобразователя.

Решение задачи организации работы последовательно соединенных по выходу ячеек для суммирования выходного напряжения предъявляет требования идентичности параметров включенных последовательно ячеек для

равномерного распределения напряжений между ними. Однако неизбежный разброс собственных параметров трансформаторов при изготовлении приведет к отклонению резонансных колоколов их АЧХ и разбросу выходных напряжений ячеек.

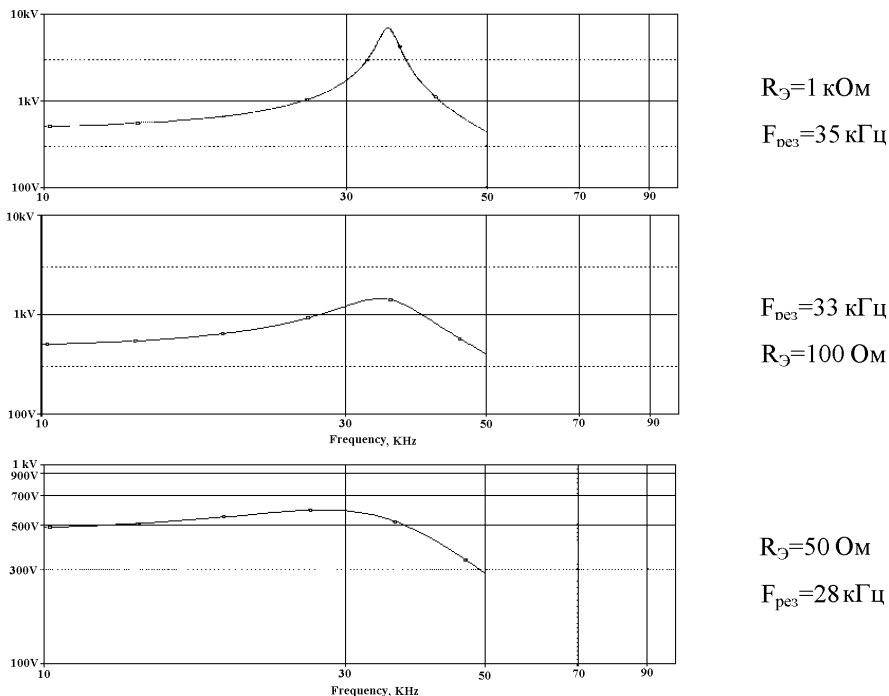


Рисунок 4 – ЛАЧХ ВВТ для разных значений эквивалентного сопротивления нагрузки

Для оценки влияния этих отклонений на работу ЗУ ячейечной структуры с суммированием выходного напряжения была промоделирована в программе PSpice T-образная модель замещения экспериментального ВВТ мощностью 2 кВт и выходным напряжением 10 кВ. Аналитически рассчитаны отклонения индуктивности рассеивания вторичной обмотки трансформатора L_{s2} и собственной емкости вторичной обмотки C_2 , соответствующие отклонению резонансной частоты, на 1, 2, 5 и 10 % в стороны увеличения и уменьшения. Для каждого из отклонений в программе PSpice были построены АЧХ трансформатора и выполнен гармонический анализ Фурье Transient/Fourier Analysis, определены амплитуды основной гармоники при заданной частоте источника напряжения 35 кГц (для номинального значения собственных L и C). По результатам моделирования построены зависимости максимального напряжения на вторичной обмотке трансформатора от от-

клонения собственных L_{s2} и C_2 (рис. 5, а и 5, б). Как следует из приведенных графиков, отклонение собственной индуктивности рассеивания вторичной обмотки трансформатора ячейки на 10 % при резонансной частоте вызывает изменение выходного напряжения в 3 раза относительно номинального значения. Отклонения такого порядка вызывают определенные трудности, вызванные неравномерным перераспределением напряжений между ячейками ЗУ вблизи резонансных режимов работы при реализации блочной структуры.

Следовательно, при последовательном по выходу включении ячеек ЗУ с разбросом собственных параметров в 10 % можно ожидать уменьшения выходного напряжения в 3 раза относительно расчетного. Такое отклонение выходного напряжения вызывает необходимость перехода от суммирования полупериодов напряжения на выходах выпрямителей синхронизированных по частоте ячеек к суммированию постоянных напряжений путем применения емкостных фильтров. В этом случае ячейки не синхронизируются по частоте, каждая ячейка настраивается на рабочую точку АЧХ своего трансформатора с учетом отклонения его параметров.

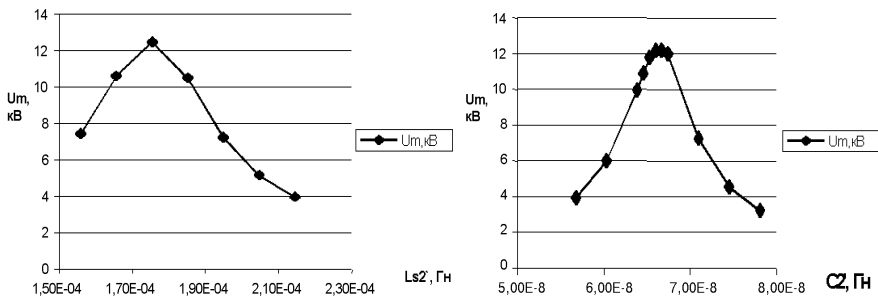


Рисунок 5 – Зависимость изменения выходного напряжения ВВТ от изменения L_{s2} и C_2

С учетом вышеизложенных требований, ячеечное ЗУ приобретает вид, как показано на блок-схеме (рис. 6). Каждая ячейка настраивается по частоте на рабочую точку своего трансформатора, обеспечивая квазирезонансный режим работы. Из группы последовательно соединенных по выходу ячеек выделяется эталонная (ячейка N), формирующая эталонное низковольтное напряжение, пропорциональное своему выходному. Эталонное напряжение формируется и остальными ячейками в силу их идентичности, но используется в них для сравнения с входящим напряжением эталонной ячейки [3]. При несоответствии эталонных напряжений (собственного ячейки и входящего от эталонной), изменяется выходное напряжение для подстройки под эталонную ячейку путем изменения рабочей точки на АЧХ ВВТ, т.е. частоты преобразования ячейки. Таким образом, в ЗУ осуществляется выравнивание напряжений. Общая система управления отслеживает аварийные режимы ра-

боты всего ЗУ, выполняет функции защиты устройства и подстройку частоты работы всех ячеек в процессе заряда ЕНЭ для обеспечения квазирезонансного режима работы ВВТ ячеек.

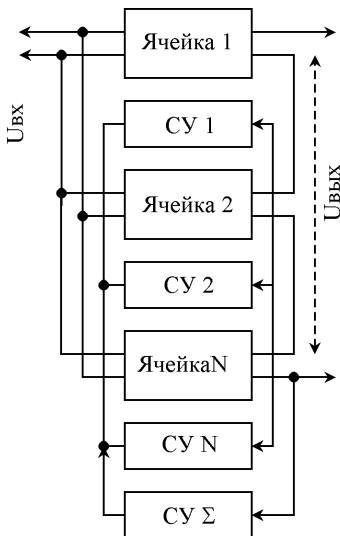


Рисунок 6 – Блок-схема ячеечного ЗУ

На основе поведенных исследований построена экспериментальная ячейка ЗУ с коррекцией отклонений собственных параметров ВВТ и проведены экспериментальные исследования работы ЗУ ЕНЭ. Проведенные исследования подтвердили адекватность результатов моделирования реальным процессам.

Список литературы: 1. *Мирошниченко Л.Н., Назарова Н.С., Казарян Ю.Г.* Анализ влияния разброса собственных параметров ВВТ на характеристики зарядного процесса емкостного накопителя ячейечной структуры // *Вісник НТУ «ХП»*. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – 2006. – № 17. – Харків: НТУ «ХП». – С. 98-104. 2. *Регулируемые источники питания для электроразрядных технологий / Л.Н.Мирошниченко, А.Н.Голобородько, Н.С.Назарова, Ю.Г.Казарян* // *Вісник НТУ «ХП»*. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – 2005. – № 49. – Харків: НТУ «ХП». – С. 104-111. 3. *Казарян Ю.Г.* Разработка блочных зарядных устройств для электроразрядных технологий // *Інформаційно-керуючі системи і комплекси: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, молодих вчених з міжнародною участю.* (10 – 11 квітня 2006 р., Миколаїв). – Миколаїв: НУК, 2006. – С.42-46.

Поступила в редколлегию 11.06.2007.